

东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称： 模拟电子电路实验

第六次实验

实验名称： 三极管放大电路频率特性的测量与研究

院（系）： 电气工程学院 专 业： 电气工程及其自动化

姓 名： 王皓冬 学 号： 16022627

实 验 室： 401 实验组别：

同组人员： 实验时间： 2024 年 5 月 7 日

评定成绩： 审阅教师：

一、实验目的

- (1) 理解三极管放大电路频率特性的基本概念
- (2) 理解三极管放大电路频率特性的测量方法
- (3) 掌握三极管放大电路频率特性的逐点测量法
- (4) 理解三极管放大电路参数对频率特性的影响

二、实验原理

1. 基本概念

放大电路的频率特性是指放大电路的放大倍数与信号频率的关系, 包括放大倍数的幅值与信号频率的关系, 也叫幅频特性; 放大倍数的相位与信号频率的关系, 也叫相频特性。

(1) 幅频特性

一般RC耦合放大电路的幅频特性如图 2-11-1 (a) 所示, 从幅频特性曲线上可以看出, 放大电路的频率特性可以分成 3 个区域, 分别叫做中频区、低频区和高频区。中间比较平坦的区域叫中频区, 左边频率相当低的区域叫做低频区, 低频区与中频区的分界点叫下限截止频率 f_L , 右边相对频率较高的区域叫高频区, 高频区与中频区的分界点叫上限截止频率 f_H 。上限频率与下限频率的差值 $f_H - f_L = BW$, 叫放大电路的频带宽度, 也叫带宽。

(2) 相频特性

RC 耦合放大电路的相频特性如图 2-11-1 (b) 所示, 从相频特性曲线上可以看出, 该放大电路在中频区已经有 180° 的相位差, 也就是反相放大, 而在低频区和高频区, 又在原有 180° 相位基础上增加了附加相位, 分别为超前移相和滞后移相。

(3) 频率特性波特图表示

如果把放大倍数用分贝 (dB) 表示, 频率用 10 倍频线性表示, 可以得到放大电路频率特性的折线表示方式, 也叫波特图表示法, 其同相放大电路的幅频特性和相频特性波特图表示法如图 2-11-2 所示。

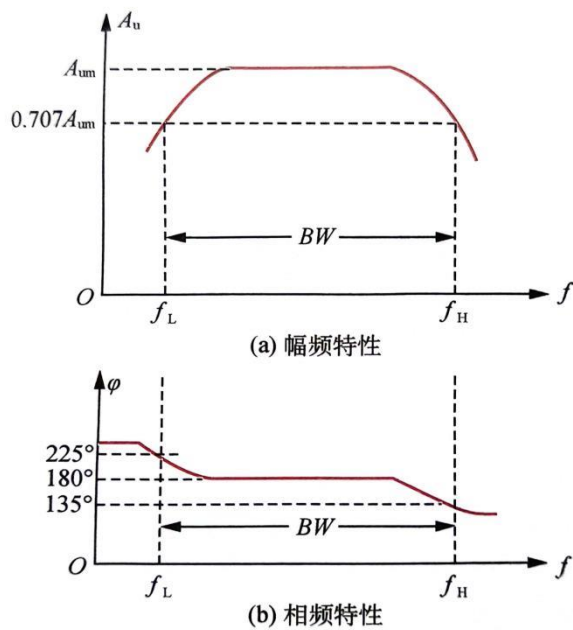


图 2-11-1 放大电路的频率特性

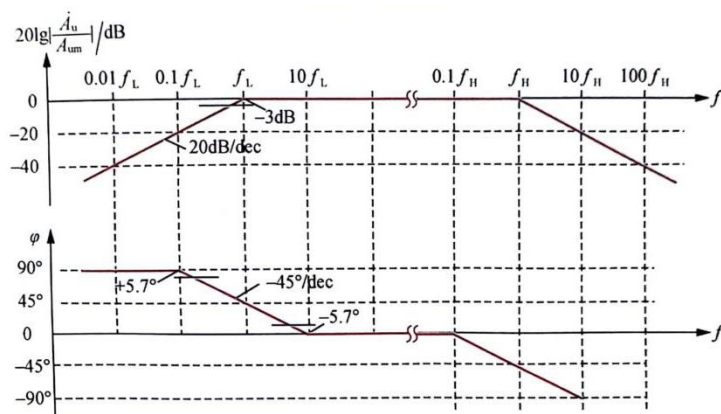


图 2-11-2 放大电路频率特性的波特图

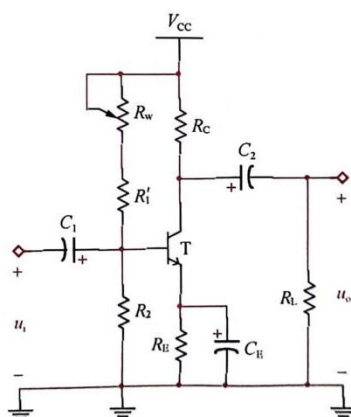


图 2-11-3 分压式偏置共发射极放大电路

2. 分压式偏置共发射极放大电路的频率特性

以 NPN 三极管 9013 为核心构成的分压式偏置共发射极放大电路图 2-11-3 所示。

(1) 低频特性

在 2.10 实验过程中, 要求输入信号的频率不能太高也不能太低, 一般选择在 1kHz 左右, 也就是在中频区。当输入信号频率逐渐降低时, 由于电容的容抗与信号频率成反比, 使原来在中频区可以认为对交流信号短路的输入耦合电容 C_1 、输出耦合电容 C_2 , 以及射极旁路电容 C_E 要呈现出阻抗特性, 导致放大电路的输出信号受信号频率的影响, 出现了放大电路的低频特性。

(2) 高频特性

由于三极管的极间电容如 $C_{b'c}$ 、 $C_{b'e}$, 以及电路分布电容等一些容量较小的电容, 原来在中频区可以按开路处理, 但随着信号频率的增大, 也将呈现出容抗效应, 导致放大电路的输出信号将随着输入信号频率的变化而变化, 呈现出放大电路的高频特性。

三、预习思考

1. 实验要求

以图 2-11-4 电路为例, 采用两种不同的测量方法, 完成放大电路频率特性的测量, 并通过实验研究电路参数对频率特性的影响。频率特性的测量方法一般有逐点测量法和扫频仪测量法。(具体测量方法见第一章 1.4.4 节)

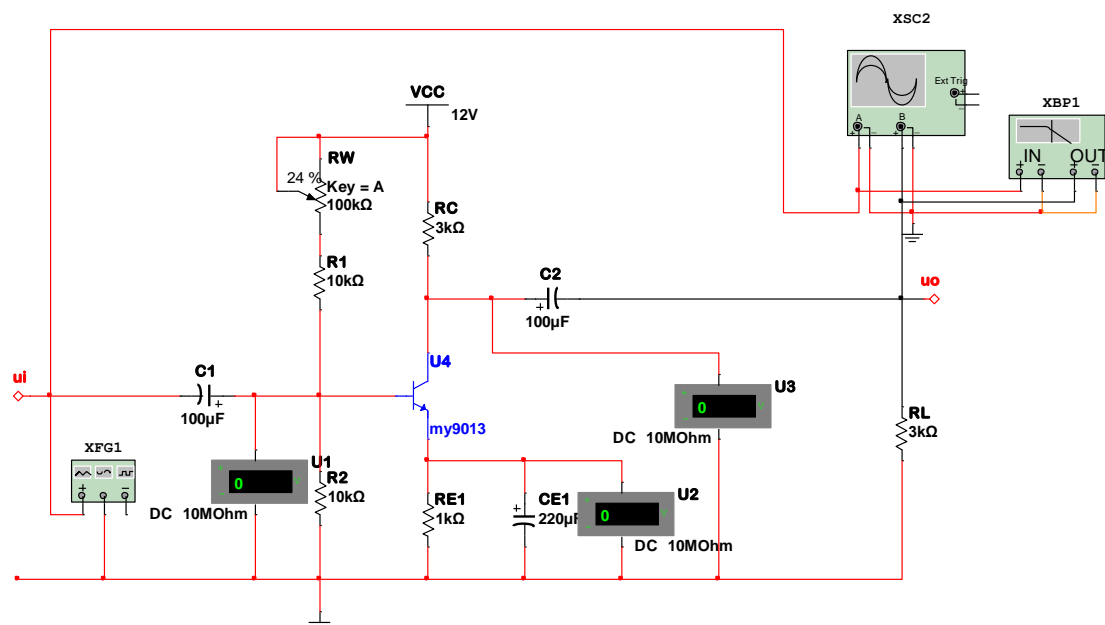
2. 仿真实验

电路如图 2-11-4 所示, 通过调整上偏置电阻中的电位器 R_w , 使发射极电阻上的电压约为 2V, 即三极管静态工作点电流 $I_c=2\text{mA}$ 。

逐点测量法: 将信号源接到放大电路的输入端, 用双通道示波器分别连接信号源和放大电路的输出端。选择一个合适的信号幅度并固定不变, 通过不断改变输入信号的频率, 测量输出信号的幅度变化并计算出增益, 测量输出信号与输入信号的相位差, 画出增益值、相位差随频率变化的规律, 得到放大电路的幅频特性曲线及相频特性曲线。

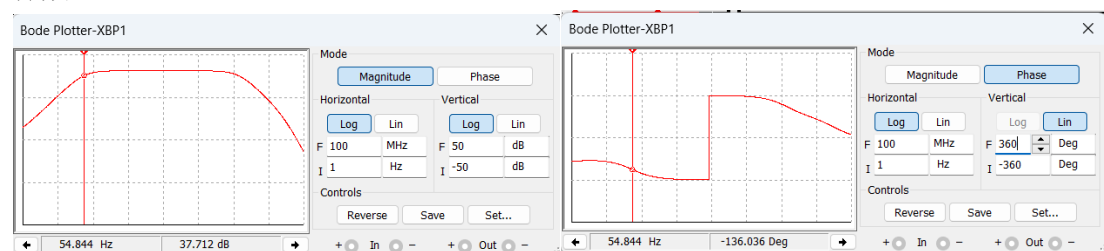
扫频仪测量法: 将放大电路的输入端接信号源, 同时连接到波特图测试仪的输入端, 放大电路的输出端连接到波特图测试仪的输出 (注意: 仿真和实物的连接方式不同, 实物扫频仪不需要信号源, 实物扫频仪的输出端要连接放大电路的输入端, 实物扫频仪的输入端连接到放大电路的输出端), 合理设置相关参数, 选择需要显示的是幅频特性还是相频特性, 就可以得到完整的频率响应特性曲线, 如图 2-11-5 所示。

搭接仿真电路如图所示。

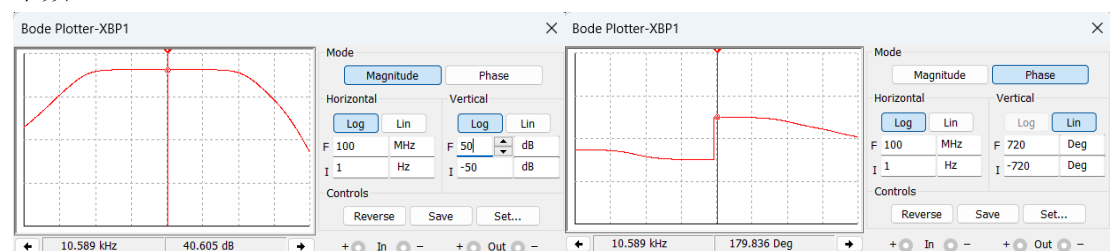


其测量结果如下。

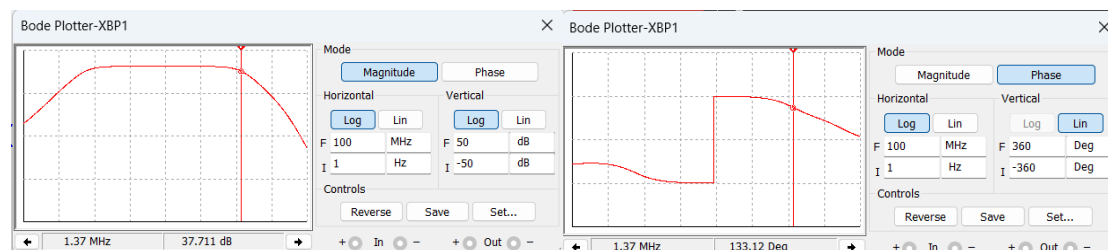
低频:



中频:



高频:



四、实验内容

3. 电路实验

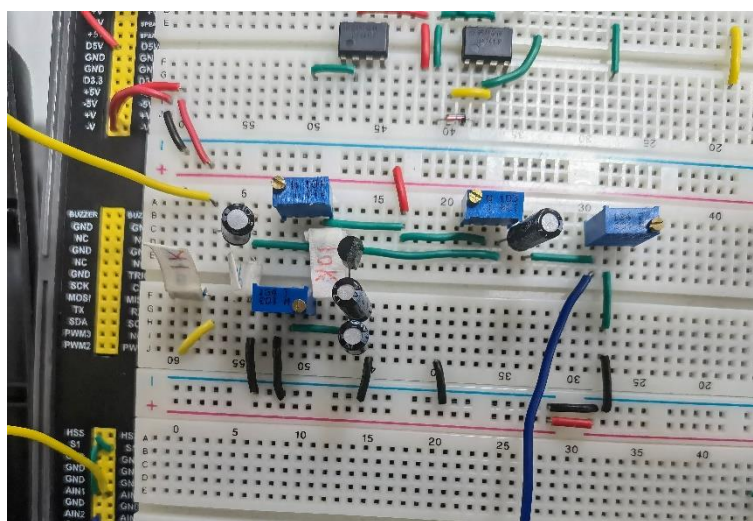
电路按照图 2-11-4 所示正确连接, 元器件参数和实验 2.10 一致, 确保正确无误, 调整电源值为 12V, 调整 R_W , 使静态集电极电流 $I_{CQ}=2\text{mA}$

(1) 逐点法测量放大电路的频率特性

选择合适的输入信号幅度, 确保在整个测量过程中, 放大电路能够不失真放大, 输入信号幅度不变, 通过调整不同的信号频率, 测量输出信号幅度。将实验数据记录在表 2-11-1 中, 并计算得到的增益值, 画出该放大电路的幅频特性曲线。(注意: 输入输出选用一致的电压, 如峰峰值、峰值、有效值、瞬时值等)

注意: f_L 为下限截止频率, f_H 为上限截止频率, f_M 为中频区频率, 以下雷同。

电路搭接如下。



调整 e 极电压约为 2V, 读出此时 R_W 的值:



//分析实验数据的方式、所推导的公式、表格格式 均为本人自编，如有雷同报告说明抄袭。本人提供报告文件是出于学习交流之意，若出现直接复制的情况与本人无关

首先对电路进行理论分析。由于这是一个共射放大电路，很容易得出电路的中频段放大倍数应为

$$\dot{A}_u = \beta \cdot \frac{R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_E}$$

式中， $R'_L = R_L // R_C$ 。

则 $C_2 = 100\mu F$ 时，在中频段近似忽略 C_2 的作用，其中频段增益为

$$\dot{A}_u = 200 \cdot \frac{1.5k}{r_{be} + (1 + \beta)R_E}$$

由 C_1 和 C_E 确定的下限截止频率为：

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi C'_1(R_s + r_{be})}$$

式中， $C'_1 = \frac{C_1 C_E}{(1 + \beta)C_1 + C_E}$ ；

由 C_2 确定的下限截止频率为：

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi C_2(R_C + R_L)}$$

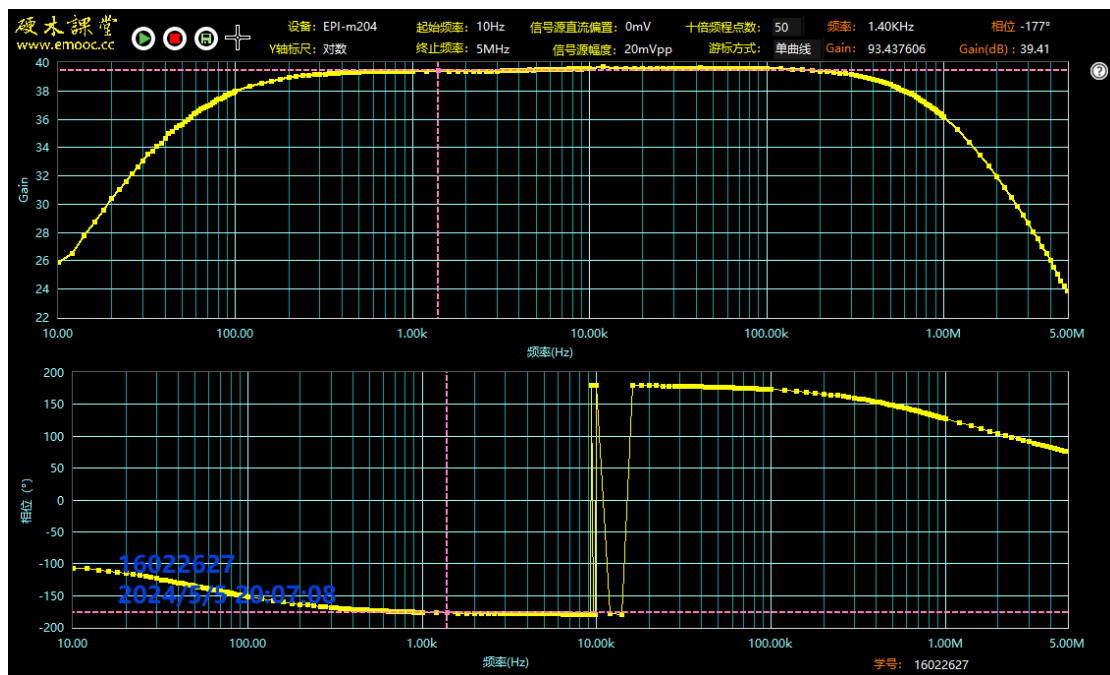
取 β 为仿真值 200，则各物理量理论数据如下：

$$C'_1 = \frac{C_1 C_E}{(1 + \beta)C_1 + C_E} = 0.0157\mu F$$

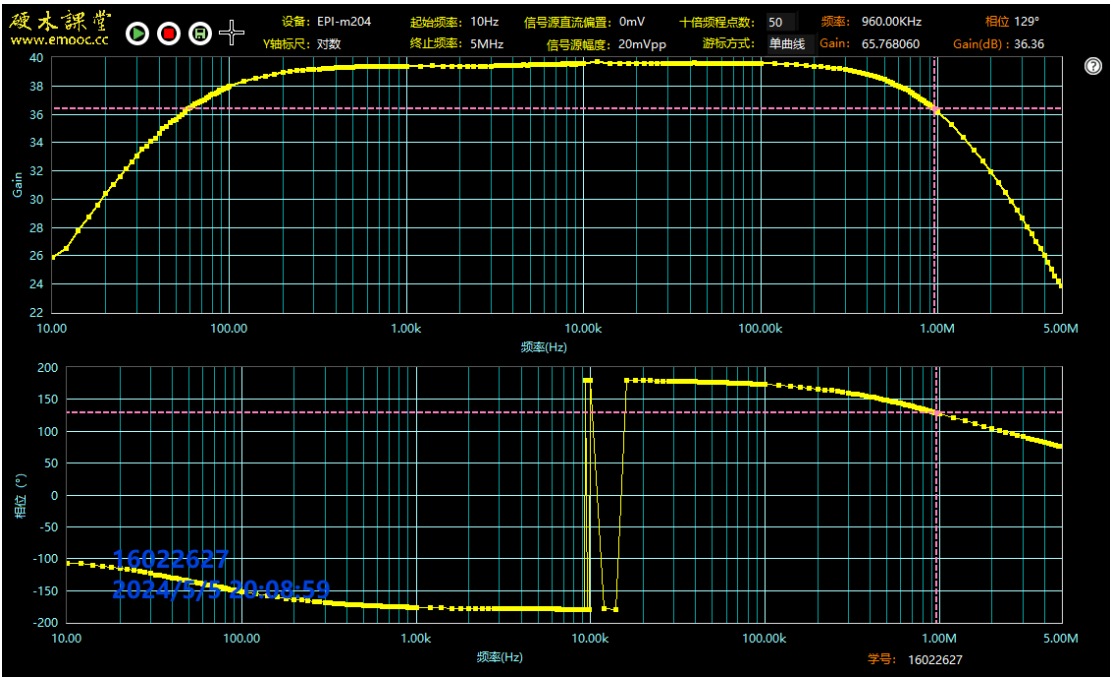
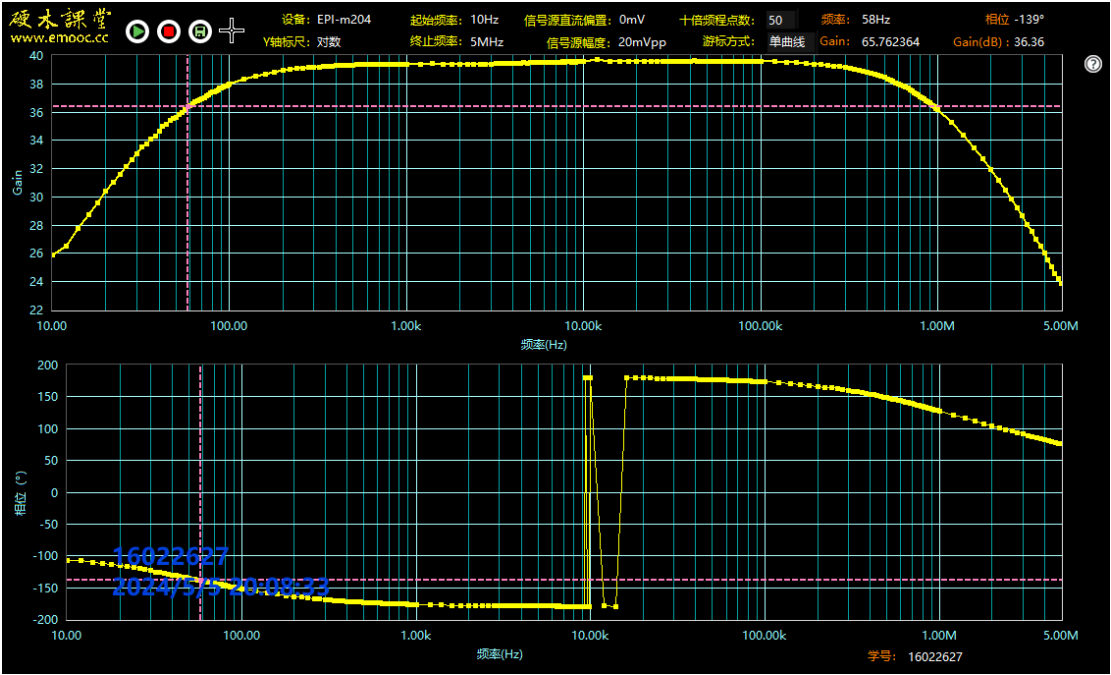
$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi C_2(R_C + R_L)} = 0.265Hz$$

由于 r_{be} 参数未知，无法得出电路理论的频率截止点。因此我们考虑实验的思路，先利用扫频获取中频段的放大倍数，再读取对应 0.707 倍放大倍数的点为截止点。

扫频结果如下。（信号源 20mVpp）



对应中频段放大倍数为 $A_u = 93.44$ ，则截止点对应的放大倍数应为 $93.44 \times 0.707 = 66.06$ 。
找出与之最邻近的点：

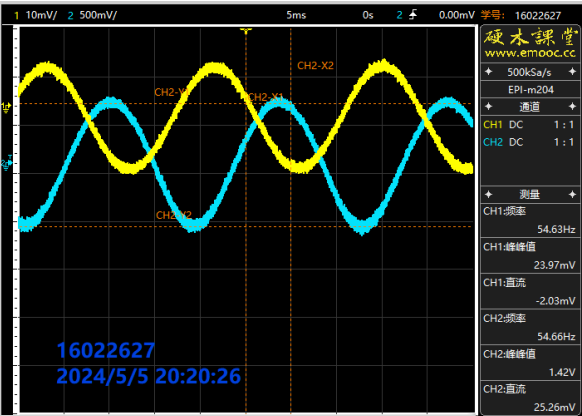
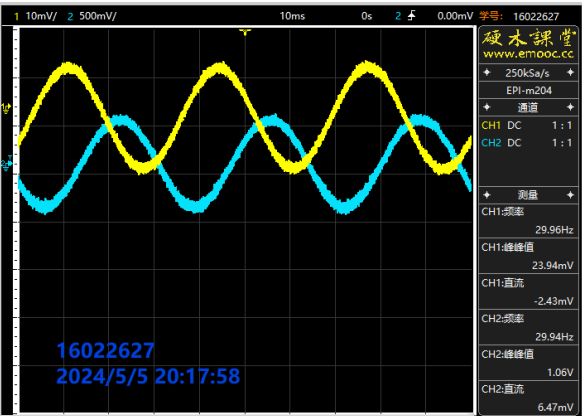


读出数值：

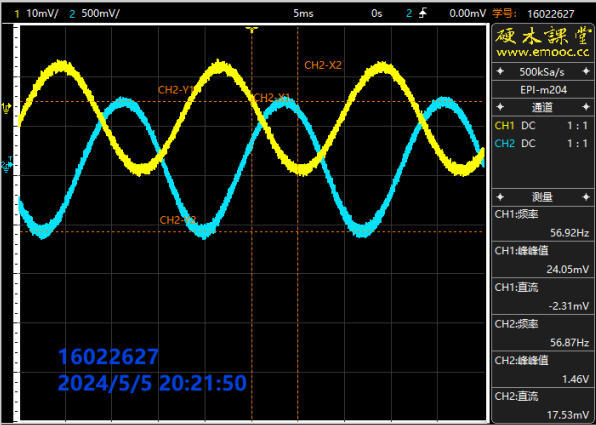
$$\begin{cases} f_L = 58\text{Hz} \\ f_H = 960\text{kHz} \end{cases}$$

| | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| $f_L = 58\text{Hz}$ | $f_M = 1.4\text{kHz}$ | $f_H = 960\text{kHz}$ |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|

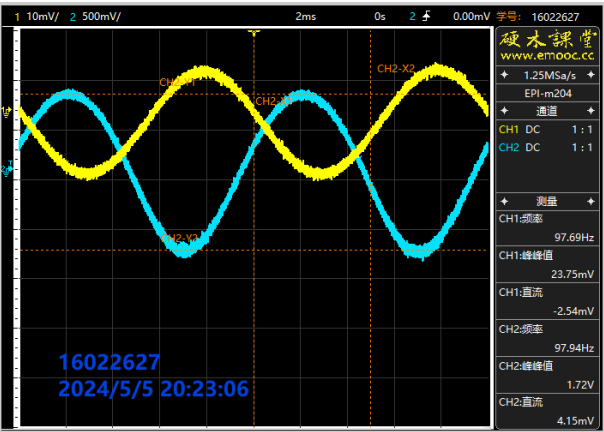
逐点法测试如下。



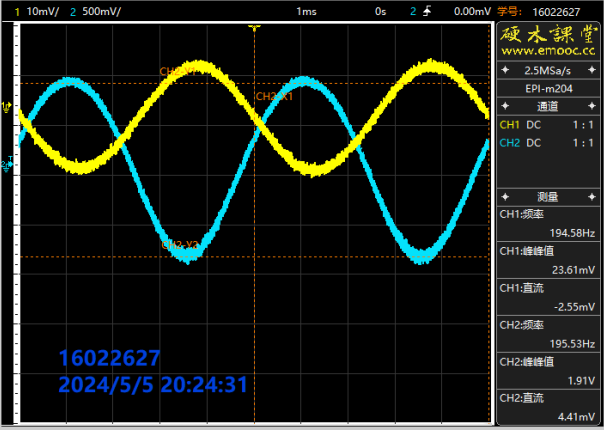
| | |
|--------------|--------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 638.15mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -656.16mV |
| ΔX: 5ms | ΔY: -1.28V |



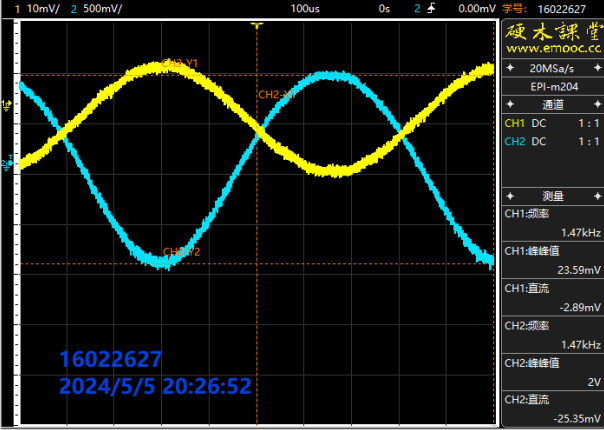
| | |
|--------------|--------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 648.38mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -673.43mV |
| ΔX: 5ms | ΔY: -1.32V |



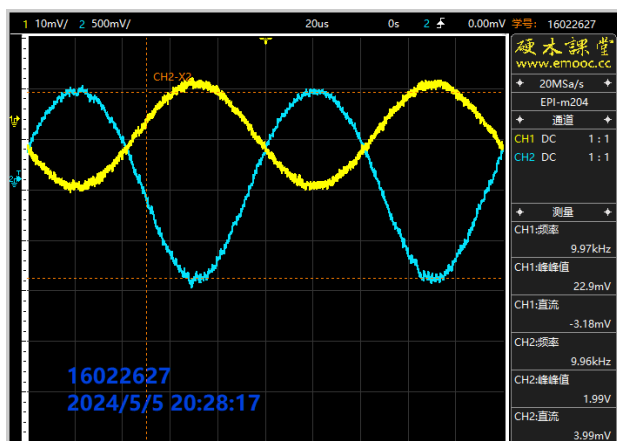
| | |
|------------------|---------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 760.69mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -811.66mV |
| ΔX : 5ms | ΔY : -1.57V |



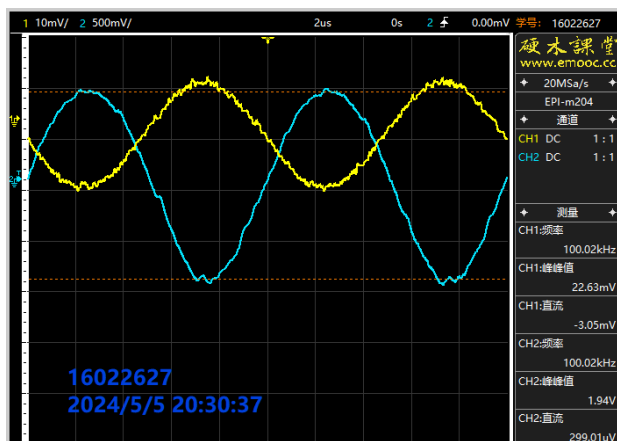
| | |
|------------------|---------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 821.17mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -923.97mV |
| ΔX : 5ms | ΔY : -1.75V |



| | |
|------------------|---------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 881.64mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -993.09mV |
| ΔX : 5ms | ΔY : -1.87V |



| | |
|--------------|--------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 864.36mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -975.81mV |
| ΔX: 5ms | ΔY: -1.84V |

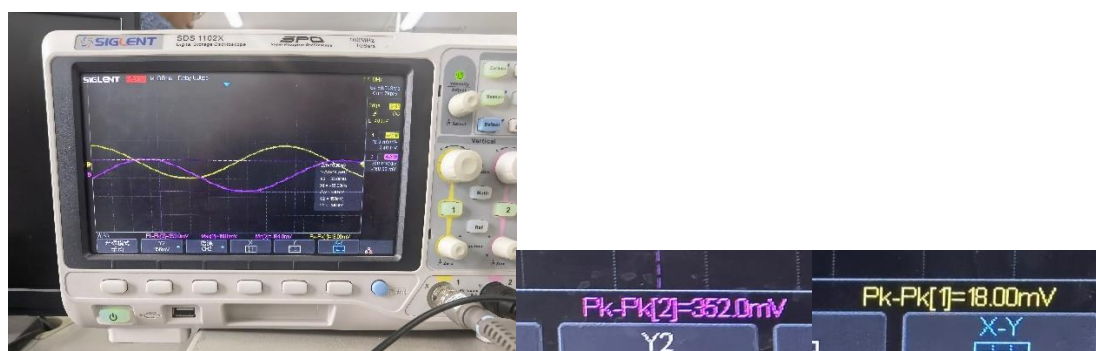


| | |
|--------------|--------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 864.36mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -975.81mV |
| ΔX: 5ms | ΔY: -1.84V |

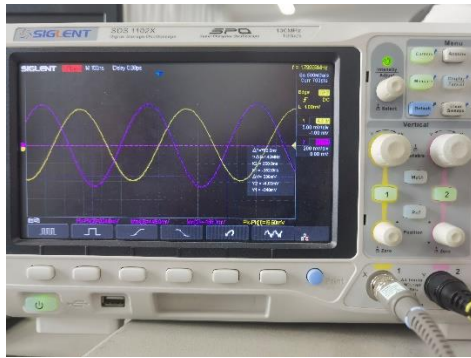
由于易派最高只能输出 100kHz 的信号，故无法测出上限截止频率部分。

实验室测量数据如下。由于实测在频率较低（10Hz 时），输入到 u_i 的信号会大幅衰减（输入电阻隔直通交），因此难以获取准确的测量值。因此，10Hz 的数据仅供参考。

$f = 10\text{Hz}$:

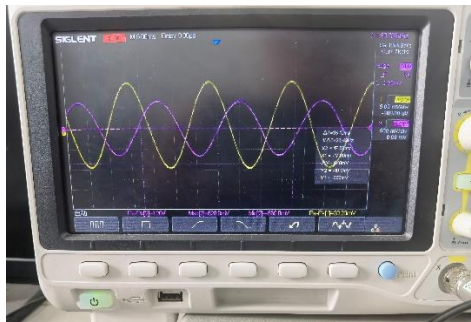


$f = 30\text{Hz}$:



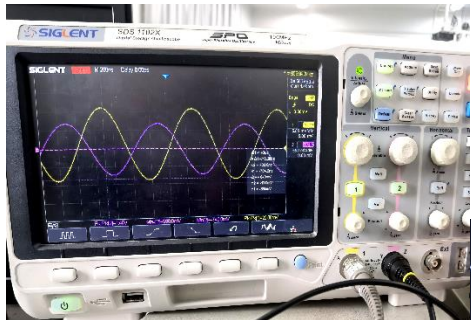
Pk-Pk[2]=904.0mV Pk-Pk[1]=19.60mV

$f = 54\text{Hz}$:



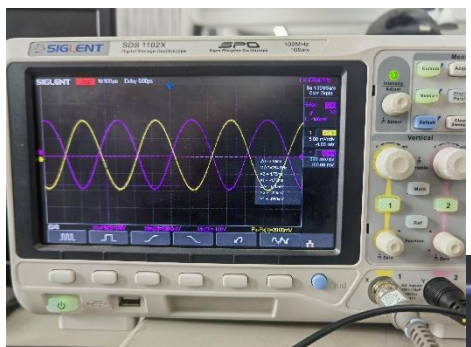
Pk-Pk[2]=1.28V Pk-Pk[1]=20.20mV

$f_L = 58\text{Hz}$:



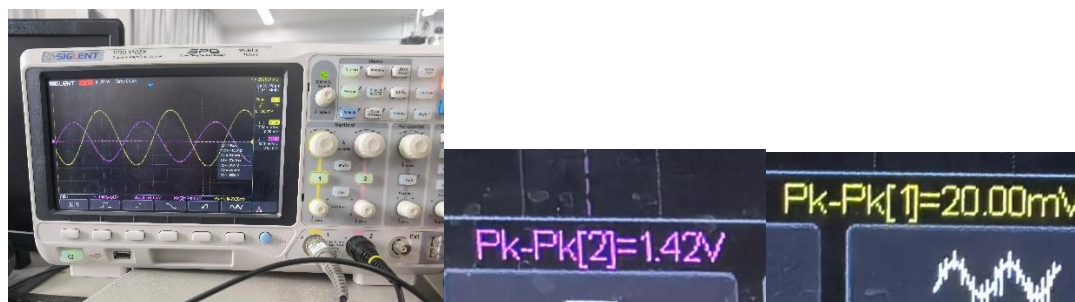
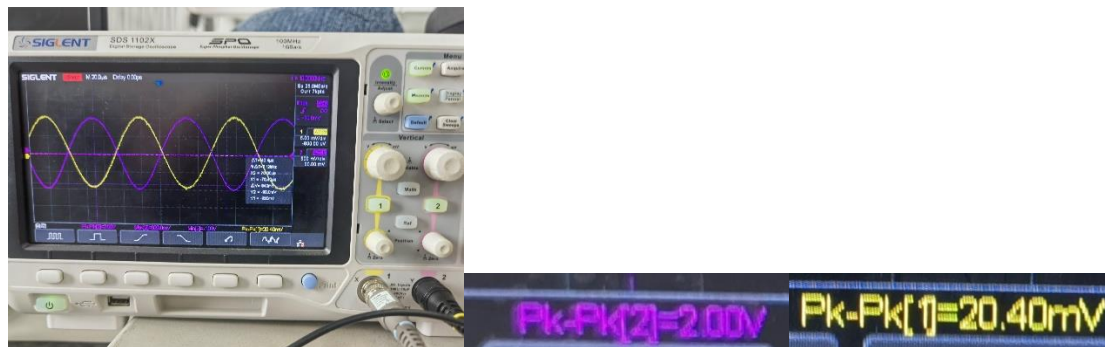
Pk-Pk[2]=1.40V Pk-Pk[1]=20.00mV

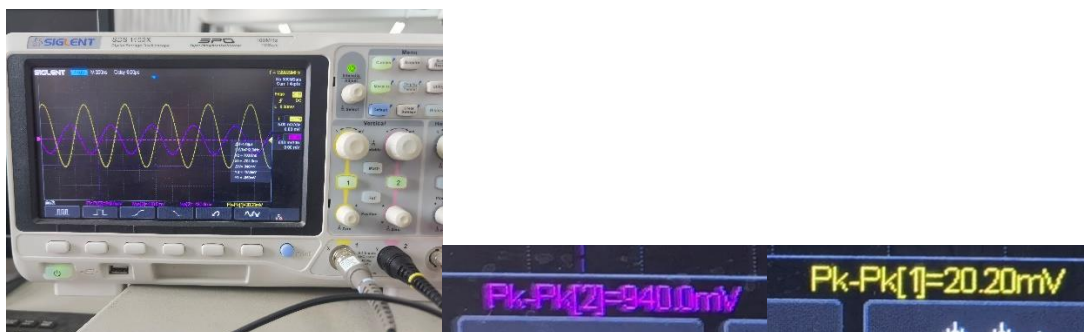
$f = 500\text{Hz}$:



Pk-Pk[2]=1.98V Pk-Pk[1]=20.00mV

$f = 10\text{kHz}$:

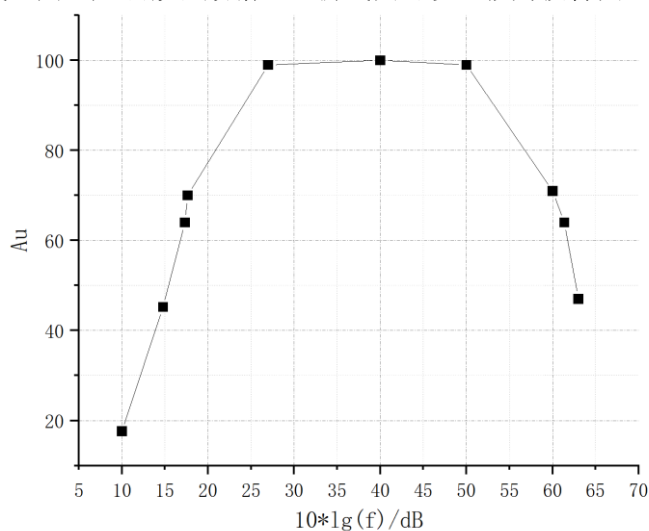




| 易派测量 | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| f/Hz | $f_1 = 10$ | $f_2 = 30$ | $f_3 = 54$ | $f_L = 58$ | $f_4 = 100$ | $f_5 = 200$ | $f_M = 1.4k$ | $f_6 = 10k$ | $f_7 = 100k$ |
| u_i / mV | 20 | | | | | | | | |
| u_o / V | 0.207 | 1.06 | 1.28 | 1.32 | 1.57 | 1.75 | 1.87 | 1.84 | 1.84 |
| A_u | 10.35 | 50.30 | 64.00 | 66.00 | 78.50 | 87.5 | 93.5 | 92 | 92 |

| 实验室测量 | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|---------------|------------|
| f / Hz | $f_1 = 10$ | $f_2 = 30$ | $f_3 = 54$ | $f_L = 58$ | $f_4 = 500$ | $f_M = 10k$ | $f_5 = 100k$ | $f_H = 1M$ | $f_6 = 1.37M$ | $f_7 = 2M$ |
| u_i / mV | 20 | | | | | | | | | |
| u_o / V | 0.352 | 0.904 | 1.28 | 1.40 | 1.98 | 2.00 | 1.98 | 1.42 | 1.28 | 0.940 |
| A_u | 17.6 | 45.2 | 64 | 70 | 99 | 100 | 99 | 71 | 64 | 47 |

以实验室数据为准，利用 Origin2022b 绘制幅频特性折线图如下（由于实验公式未知，且无合适的预设公式，因此无法拟合数据）。折线图可以近似为波特图。



结果表明，电路是一个**带通电路**，其频率特性分别为

| | | |
|---------------------|----------------------|---------------------|
| $f_L = 58\text{Hz}$ | $f_M = 10\text{kHz}$ | $f_H = 1\text{MHz}$ |
|---------------------|----------------------|---------------------|

该结果与扫频测量结果相差不大。

(2) 扫频仪测量放大电路的频率特性

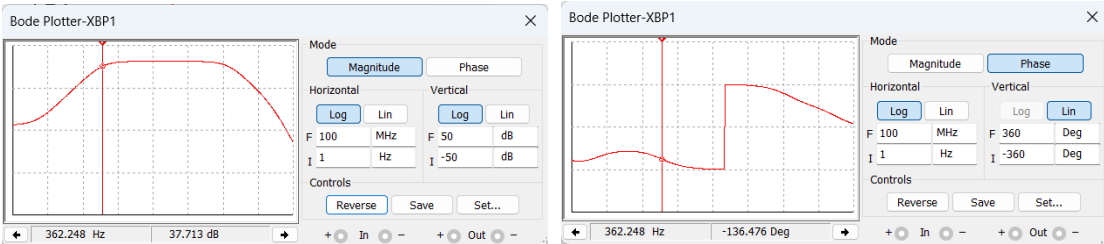
利用扫频仪测量放大电路的幅频特性曲线, 并通过扫频仪的游标设置, 直接读出放大电路的上、下限截止频率, 将测量数据填入表 2-11-2 中。

(3) 研究放大电路参数对频率特性的影响

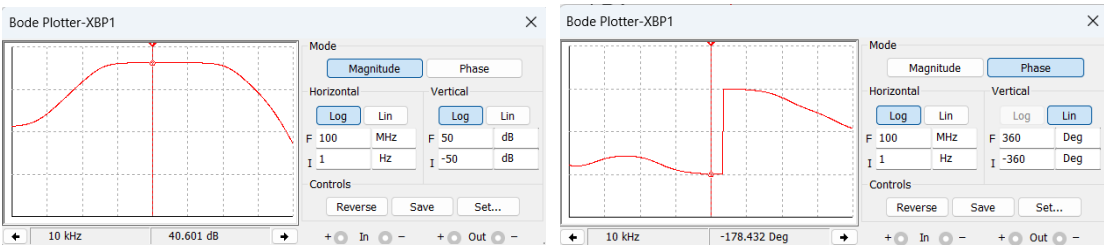
由理论分析可知, 图 2-11-3 所示共发射极放大电路的低频响应是由耦合电容 C_1 、 C_2 , 以及射极旁路电容 C_E 决定的, 尤其是 C_E 对电路的下限频率影响更大。以改变 C_E 为例, 如果把电路中的 C_E 由原来的 $100\mu\text{F}$ 改为 $33\mu\text{F}$, 再测量该电路的频率特性, 将测量数据记录在表 2-11-3 中, 分析研究电路参数对电路性能的影响。改变 C_1 、 C_2 , 对电路频率特性影响的实验方法类同, 可以自行完成。

C_E 改为 $33\mu\text{F}$ 后, 静态工作点未发生改变, 仿真结果如下。

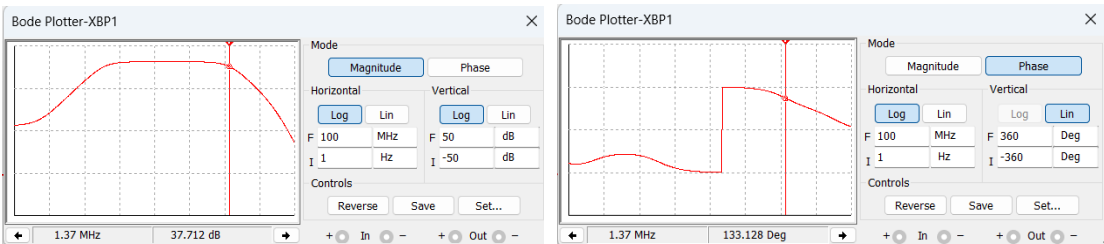
低频:



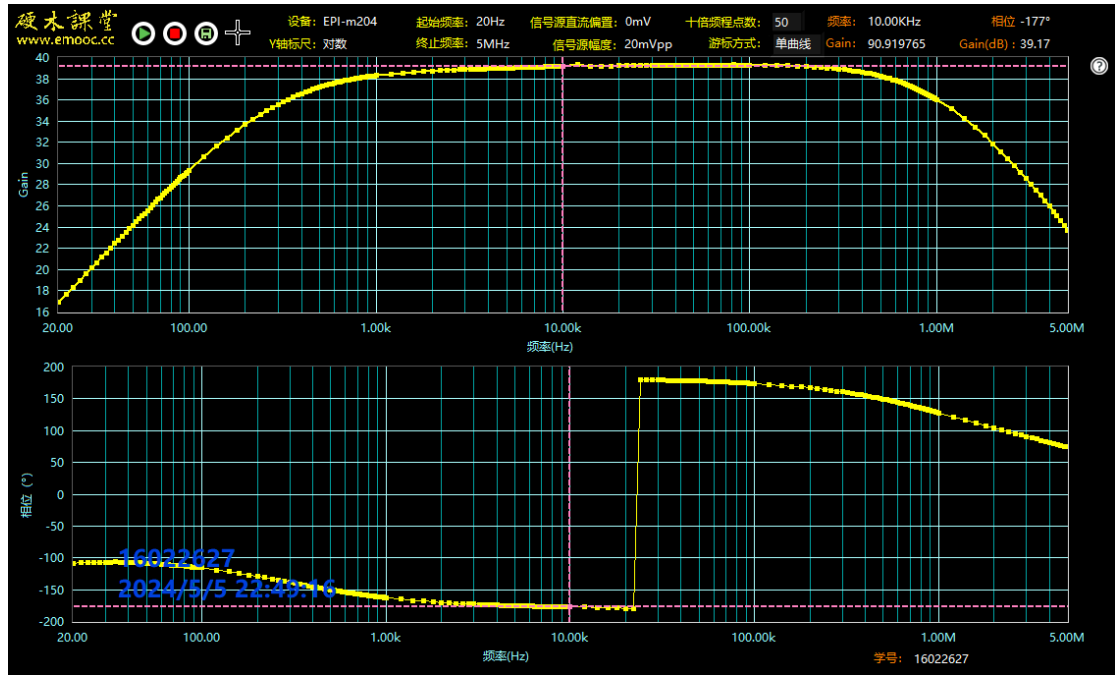
中频:



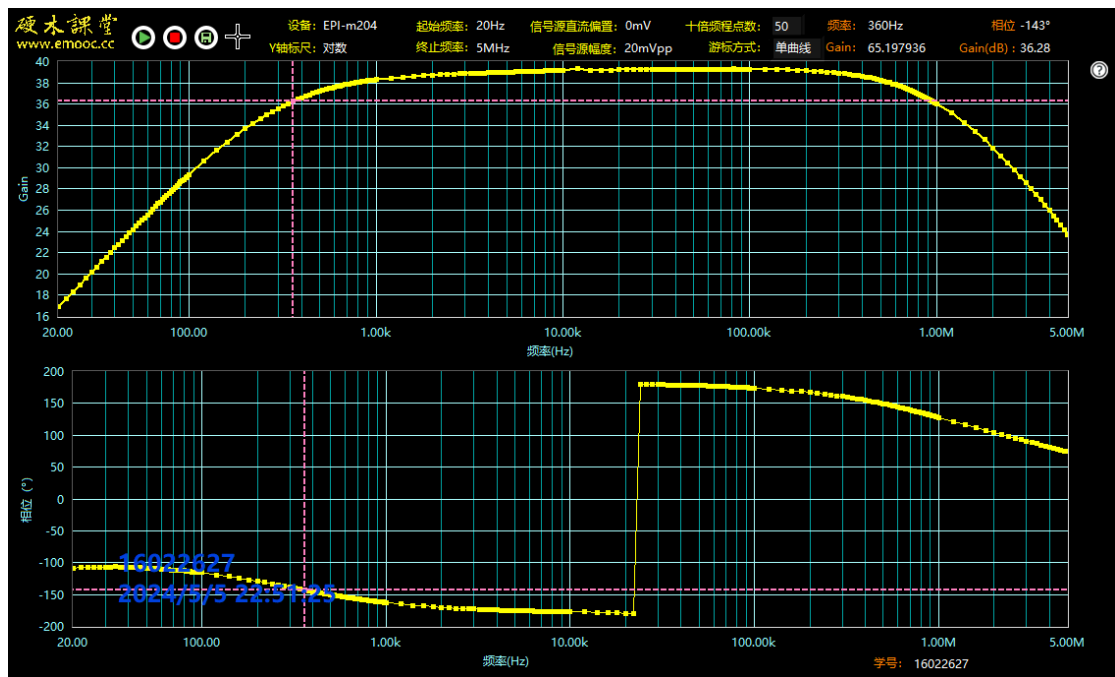
高频:

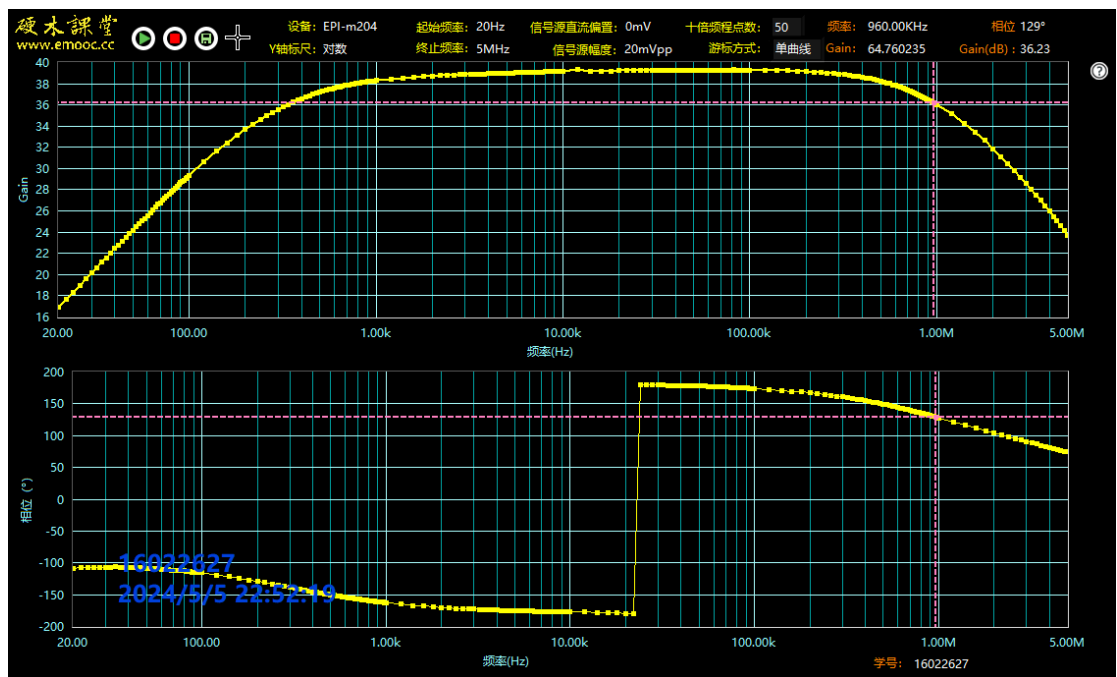


扫频结果如下。(信号源 20mVpp)



对应中频段放大倍数为 $A_u = 90.92$ ，则截止点对应的放大倍数应为 $90.92 \times 0.707 = 64.28$ 。
找出与之最邻近的点：

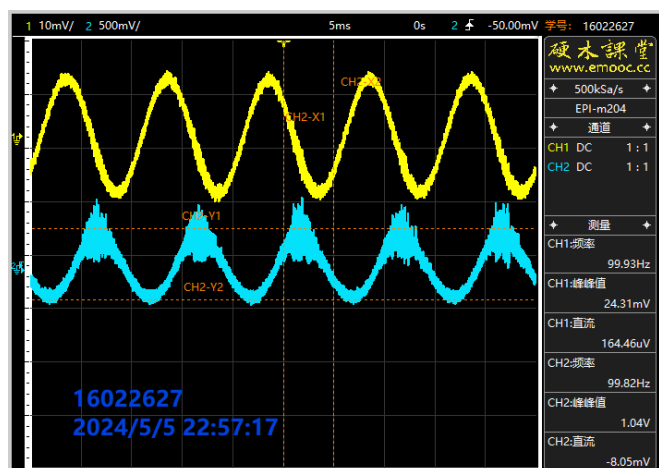
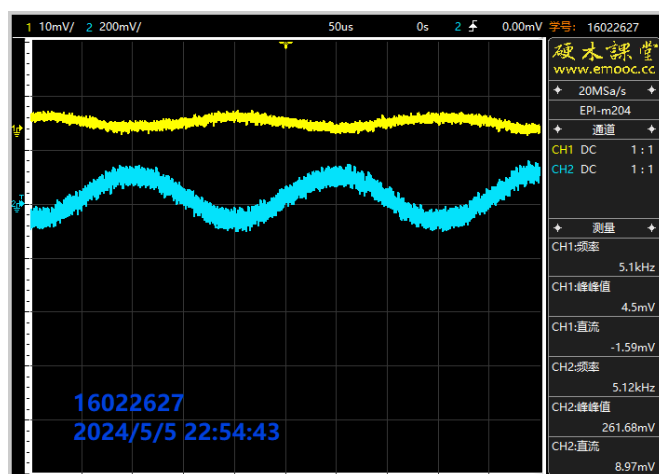




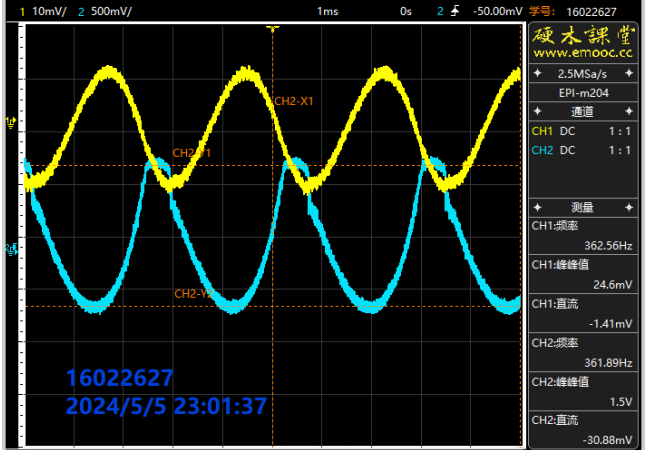
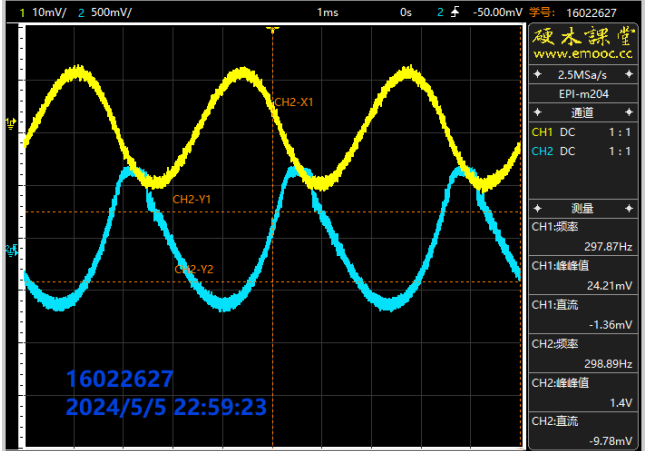
读出数值:

$$\begin{cases} f_L = 360\text{Hz} \\ f_H = 960\text{kHz} \end{cases}$$

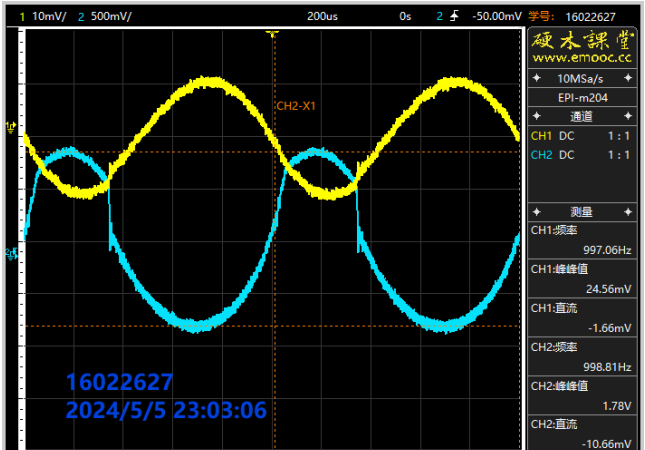
| | | |
|----------------------|----------------------|-----------------------|
| $f_L = 360\text{Hz}$ | $f_M = 10\text{kHz}$ | $f_H = 960\text{kHz}$ |
|----------------------|----------------------|-----------------------|



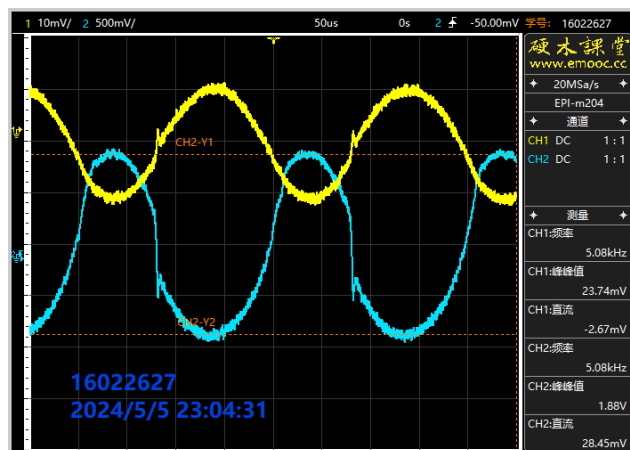
| | |
|------------------|------------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 351.13mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -319.01mV |
| ΔX : 5ms | ΔY : -665.23mV |



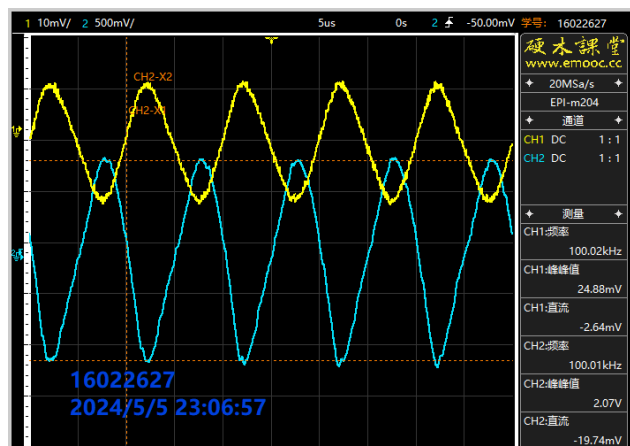
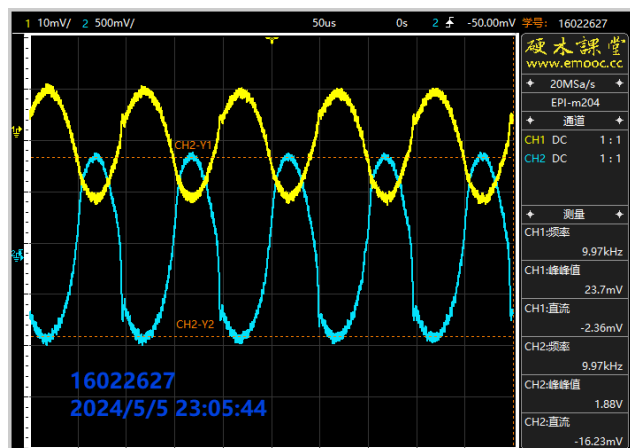
| | |
|------------------|---------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 778.19mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -560.91mV |
| ΔX : 5ms | ΔY : -1.34V |



| | |
|------------------|---------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 950.97mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -707.78mV |
| ΔX : 5ms | ΔY : -1.66V |



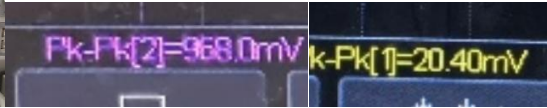
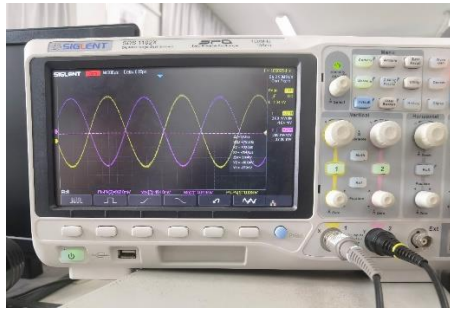
| | |
|------------------|---------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 968.25mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -776.89mV |
| ΔX : 5ms | ΔY : -1.75V |



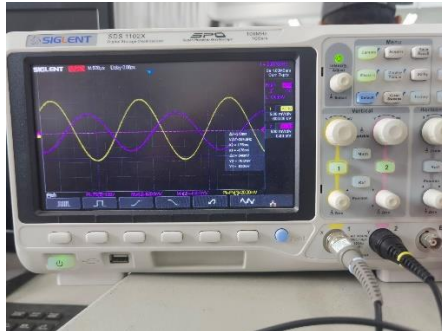
| | |
|------------------|---------------------|
| CH2-X1 : 0s | CH2-Y1 : 899.14mV |
| CH2-X2 : 5ms | CH2-Y2 : -1.05V |
| ΔX : 5ms | ΔY : -1.95V |

同样，由于易派最高只能输出 100kHz 的信号，故无法测出上限截止频率部分。由于实测在频率较低（10Hz 时），输入到 u_i 的信号会大幅衰减（输入电阻隔直通交），因此难以获取准确的测量值。该电路中信号源频率为 10Hz 的情况下，输入为 20mV 时实际 u_i 约为 5mV，差距过大，因此**舍弃了 10Hz 的数据测量**，直接从 100Hz 开始。

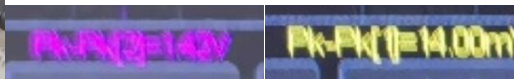
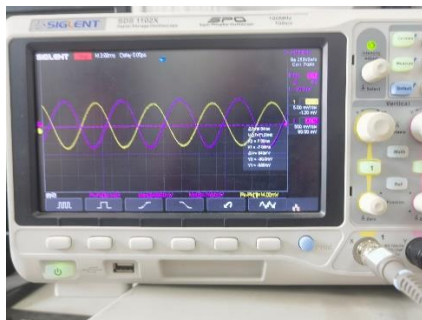
$$f = 100\text{Hz:}$$



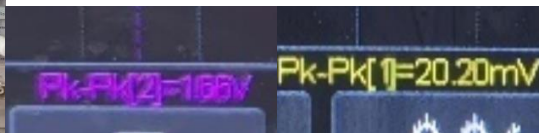
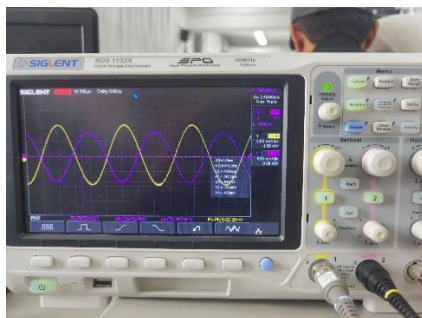
$f = 300Hz:$



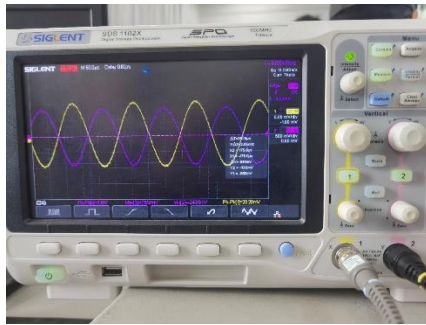
$f_L = 380Hz:$



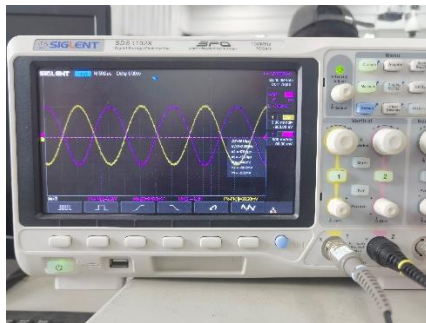
$f = 1kHz:$



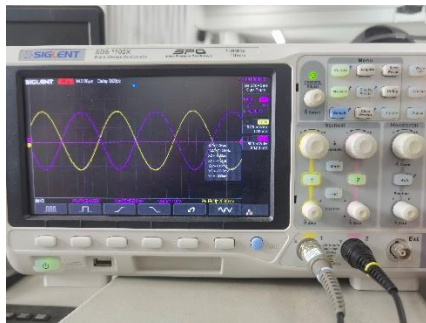
$f = 5kHz:$



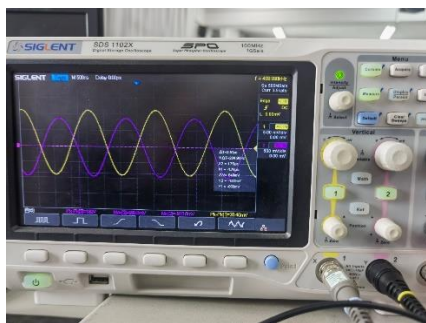
$f = 10\text{kHz}$:



$f = 100\text{kHz}$:



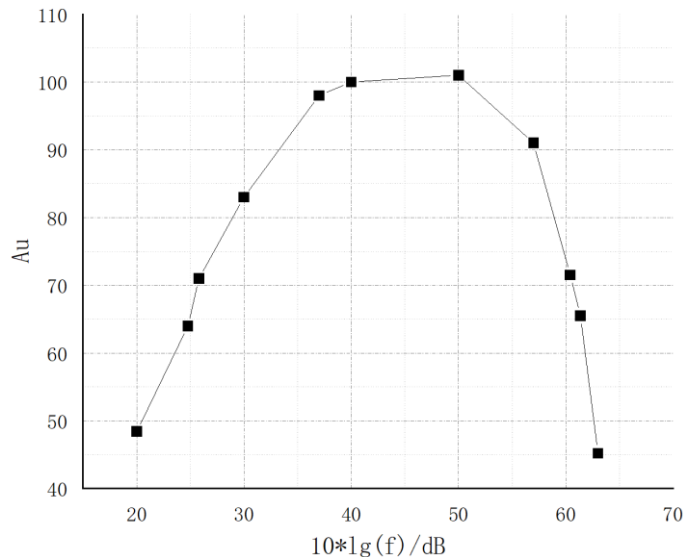
$f = 500\text{kHz}$:



$f = 1\text{MHz}$:

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| u_o /V | 0.968 | 1.28 | 1.42 | 1.66 | 1.96 | 2.00 | 2.02 | 1.82 | 1.43 | 1.31 | 0.90 4 |
| A_u | 48.4 | 64 | 71 | 83 | 98 | 100 | 101 | 91 | 71.5 | 65.5 | 45.2 |

以实验室数据为准，利用 Origin2022b 绘制幅频特性曲线如下（同样，由于实验公式未知，且无合适的预设公式，因此无法拟合数据）。折线图可以近似为波特图。



拟合结果表明，电路是一个**带通电路**，其频率特性分别为

| | | |
|----------------------|----------------------|-------------------|
| $f_L = 380\text{Hz}$ | $f_M = 10\text{kHz}$ | $f_H = 1\text{M}$ |
|----------------------|----------------------|-------------------|

与扫频测量结果相差不大，可以作为实际通频特性的测量数据。

对比分析：

与改变电容前的实验结果对比，可以发现，减小射极旁路电容的容值，会使下限截止频率右移，而对高频特性影响不大。同时，其频带较窄。这表明电路更适用于专一地放大某一频带的信号。

这是因为，旁路电容 C_E 主要决定着电路的低频特性，电路的高频特性主要由其他电容决定。当旁路电容的容值增大时，其与负载电阻并联的等效电容增大，导致高通滤波器的截止频率减小：输入信号的低频部分将被更有效地通过，从而使得下限频率降低。反之，高通滤波器的截止频率增加，导致下限频率升高。

误差分析：

本次实验（包括上次实验）所测出的结果都与仿真结果有较大差异。推测其原因如下。

查阅资料后发现，9013 号三极管实际放大倍数会在约 150~240 间波动，而仿真时三极管的 β 取值为 200。同时，三极管实际的**结电容**是不同的，其频率特性有很大不同。这是造成误差的主要原因。

本次实验结果中，**低频特性均与仿真无太大差异，而高频特性与仿真差别较大**。推测这主要是结电容不同造成的。该推测可以由实验结果佐证：由于**低频特性主要取决于 C_E** ，因此 C_E 误差不大时，实际低频特性与仿真相差不会太大。而高频特性会随结电容的变化而明显变化，因此实验中低频特性均符合仿真结果，高频特性差异较大。

五、实验总结

本次实验中我们主要研究了三极管放大电路的频率响应相关性能。本次实验应该是这学期最轻松的一次实验了，实验内容也和运放频率响应实验差不多。不过，显然，实验中对频

率特性的研究是不够的。本次实验佐证教材的最大的一点，在于多级容阻耦合电路会带来极大的频率漂移累积。因此，容阻耦合电路虽然能够隔离每级放大电路的静态工作点，但频率特性极差，集成运放中并不采用，甚至不采用单支放大的射极放大电路。